

# PRZELĄCZENIA AWARYJNE ORAZ ANALIZA STANÓW PRZEJŚCIOWYCH WIELOKANALOWEGO PRZEKSZTAŁTNIKA SIECIOWEGO

Katarzyna Przytuła

Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych

**Streszczenie.** Zwiększająca się liczba odnawialnych źródeł energii, aktywnych kompensatorów mocy biernej oraz innych urządzeń wymagających zastosowania energoelektronicznych systemów, powoduje wzrost liczby wyższych harmonicznych w przebiegach prądów i napięć sieci elektroenergetycznej. Artykuł prezentuje jedno z możliwych rozwiązań sterowania wektorowego VOC równoległe połączonych przekształtników przystosowanych do współpracy z siecią. Zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych układu przekształtnika wielokanałowego podczas zakłóceń takich jak przerwa lub zwarcie faz. Przeanalizowano wzajemny wpływ przekształtników pod kątem prądów płynących w poszczególnych fazach.

**Słowa kluczowe:** przekształtniki wielokanałowe, VOC, przekształtniki DC/AC, zakłócenia

## EMERGENCY SWITCHING AND ANALYSIS OF THE TRANSIENT STATES OF AN INTERLEAVED CONVERTER

**Abstract.** The growing number of renewable energy sources, active compensators of reactive power and other devices requiring power electronic systems increases the number of higher harmonics in current and power grid voltage waveforms. The paper presents one of the possible solutions of using vector control VOC in parallel converters that can work with the power grid. The study includes simulations of an interleaved converter's operation during such disturbances as interruption or short circuit. The mutual interaction of converters is also analyzed for currents flowing in the individual phases.

**Keywords:** interleaved converters, VOC, DC/AC converters, distortion measurement

### Streszczenie

W ostatnich latach, na całym świecie zaobserwowano szybki wzrost liczby urządzeń energoelektronicznych, które są nieodłącznym elementem w życiu codziennym. Omawiane w niniejszym artykule przekształtniki energoelektroniczne znalazły zastosowanie w jednej z ważniejszych dziedzin światowej energetyki, jakimi są odnawialne źródła energii. Niemalże każda elektrownia wiatrowa, czy fotowoltaiczna posiada w swojej strukturze przekształtnik energoelektroniczny, który zapewnia odpowiednie dopasowanie parametrów energii przesyłanej do sieci elektroenergetycznej. Ponadto wykorzystuje się je do budowania stacji przekształtnikowych HVDC dla systemów przesyłu DC na dalekie odległości, a także do układów typu FACTS (ang. *Flexible Alternating Current Transmission System*) pozwalających elastycznie korygować parametry sieci elektroenergetycznych [5]. Te ostatnie zapewniają płynną regulację napięcia oraz mocy biernej w sieci. Niestety, włączanie do systemu elektroenergetycznego coraz większej liczby urządzeń energoelektronicznych skutkuje pojawianiem się wyższych harmonicznych w sieci, a co za tym idzie do ogólnego pogorszenia parametrów jakości energii elektrycznej. Niezbędne jest więc ciągle ulepszanie topologii układów przekształtnikowych i ich systemów sterowania.

Trendy rynkowe pokazują, że coraz częściej przekształtniki grupuje się w formie stacji. Daje to wymierne efekty ekonomiczne poprzez zastosowanie grupowego chłodzenia wymuszonego czy wspólnego kontenera. Stacja taka może stać samodzielnie, na przykład na terenie farmy fotowoltaicznej. W przypadku większych stacji OZE stojących w oddaleniu od konwencjonalnych źródeł zasilania, priorytetem staje się niezawodność, ograniczanie harmonicznych wprowadzanych do sieci oraz koszty budowy tych układów. Wspomniana niezawodność stacji przekształtnikowej wiąże się na przykład z przejściem przekształcania energii uszkodzonego przekształtnika przez przekształtniki, które nie uległy awarii, zapewniając w ten sposób ciągłość pracy systemu [2].

Głównymi przyczynami awarii typu zwarcie jednego z kluczy przekształtnika lub całej gałęzi mogą być: przegrzanie klucza (wynikające z awarii układów chłodzących) i jego wyłączenie chroniące go przed całkowitym uszkodzeniem, przepięcia występujące w systemie, błąd systemu sterowania, a nawet zaplanowane prace konserwacyjne. Taka sytuacja doprowadza układ do złego przełączania tranzystorów i awaryjnej pracy stacji. Zwarcie powinno być wykryte natychmiastowo, a informacja zwrotna musi trafić do układu sterującego przekształtnikami. W przypadku zastosowania tytułowych przekształtników wielokanałowych

istnieje możliwość natychmiastowego wyłączenia uszkodzonego fragmentu obwodu i przejście do dalszej pracy. Dzieje się to bez przerwy w dostawie energii. Natomiast w przypadku pojedynczych przekształtników wykrycie awarii klucza powoduje wyłączenie całego przekształtnika i przerwanie jego pracy, co skutkuje przerwaniem dostawy zasilania.

Celem niniejszego artykułu jest wskazanie korzyści ze stosowania przekształtników wielokanałowych. Tak aby zwiększyć ilość mocy przesyłanej przez stację przekształtnikową zaproponowano układ dwóch przekształtników połączonych równoległe z trybem pracy wielokanałowej [6]. Zakres artykułu obejmuje symulacje zwarć i przerw w fazach poszczególnych przekształtników, omówienie przebiegów prądów na wyjściu układów oraz rozkład prądów w modelowanym systemie.

### 1. Przekształtnik dwukanałowy

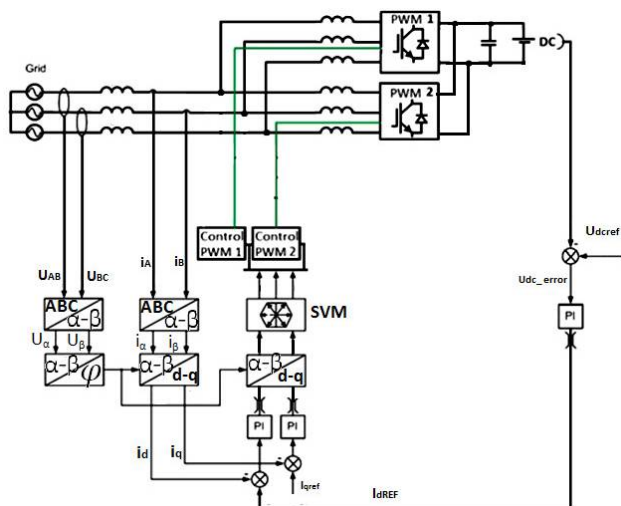
Badanym układem jest dwukanałowy dwupoziomowy przekształtnik [3], który w czasie symulowanej awarii jednego z nich dokonuje przełączenia z pracy wielokanałowej dwóch przekształtników na pracę jednego sprawnego.

Celem badań jest analiza zdarzeń między badanymi falownikami względem siebie. Z tego względu sieć modelowa jest mocna czyli cechuje się niską impedancją źródeł. Schemat układu przedstawiony jest na rysunku 1. Metoda, którą wybrano do tego typu zadań to VOC [1]. Zaletami takiego sterowania są:

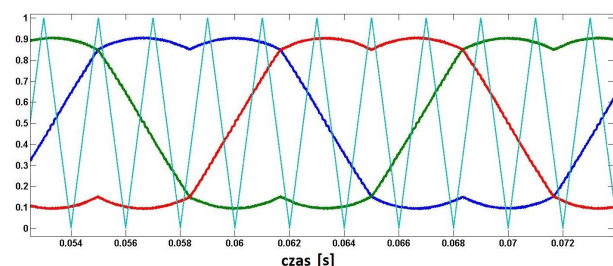
- niezależne sterowanie mocą czynną i bierną,
- stała częstotliwość kluczowania,
- dobra dynamika w trakcie trwania stanów przejściowych.

Sterowanie wektorowe VOC bazuje na sprowadzeniu trójfazowego systemu stacjonarnego  $abc$  do układu wektora przestrzennego, umiejscowionego w wirującym układzie współrzędnych  $dq$ . Po dokonaniu przekształceń sygnał trójfazowy jest rozbijany na dwie składowe:  $i_d$  – prąd czynny oraz  $i_q$  – prąd bierny. Następnie na podstawie napięcia na szynie DC falownika oraz zadanych prądów referencyjnych wyliczane są błędy sterowania  $i_{d\_error}$  oraz  $i_{q\_error}$ . Obliczone błędy trafiają do regulatorów prądu PI gdzie obliczane są sygnały sterujące układem modulacji SVM przekształtnika [7, 8].

Równoległą pracę dwóch przekształtników uzyskuje się poprzez nałożenie sygnału pilotującego na sygnał trójfazowy wyliczony w układzie sterowania [8] (rys. 2). W miejscach przecięcia sygnału modulującego z sygnałem modulowanym moduł PWM zmienia stan na przeciwny. Powstały w ten sposób sygnał PWM trafia do dwóch identycznych modułów tranzystorowych.

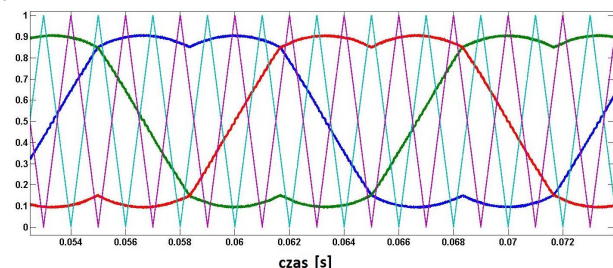


Rys. 1. Schemat systemu sterowania przekształtnikiem wielokanałowym, bazujący na sterowaniu wektorowym VOC



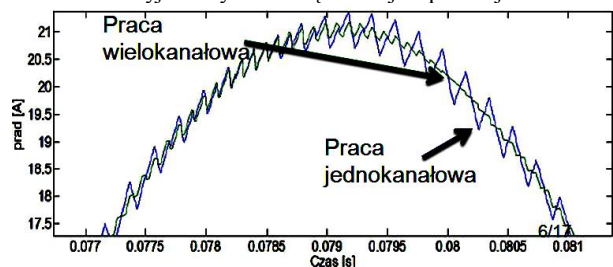
Rys. 2. Sygnał modulujący i modulowany w układzie sterowania VOC

Natomiast, aby przekształtniki pracowały w układzie wielokanałowym, modulujące sygnały piłokształtnie przesuwają się względem siebie o  $180^\circ$  tak, jak to przedstawia rys. 3. W ten sposób powstają sygnały PWM, które są względem siebie przesunięte w fazie.



Rys. 3. Sygnał modulujący w układzie dwóch wielokanałowych przekształtników połączonych równolegle

Wyliczone sygnały trafiają do identycznych modułów tranzystorowych. Celem takiego działania jest zmniejszenie zawartości wyższych harmonicznych w przebiegu sinusoidalnym prądu na wyjściu przekształtnika rys. 4, bez konieczności stosowania filtrów wychwytujących o zwiększonej impedancji.



Rys. 4. Porównanie napięcia na wyjściu układu przekształtników podczas pracy wielokanałowej i jednokanałowej

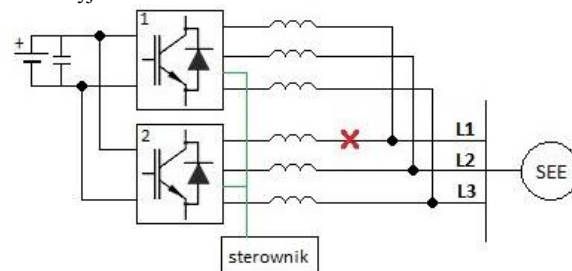
Redukcja wyższych harmonicznych prądu wynika z przesunięcia ich względem siebie o  $180^\circ$ . W przypadku, gdy harmoniczne mają identyczne amplitudy a przeciwne znaki, następuje zjawisko znoszenia się ich nawzajem. Korzyścią jest więc poprawa współczynnika THD napięcia i prądu oraz zmniejszenie kosztów budowania kolejnych filtrów, przy takich samych częstotliwościach taktowania tranzystorów [3].

## 2. Stany przejściowe i przełączenia awaryjne podczas zakłóceń w sieci elektroenergetycznej

W celu zbadania stanów przejściowych występujących w przekształtniku wielokanałowym podczas zakłócenia, wykorzystano program MATLAB/Simulink. Dokonano analizy sygnałów napięciowych i prądowych na zaciskach wyjściowych przekształtnika podczas zakłóceń pochodzących od strony sieci.

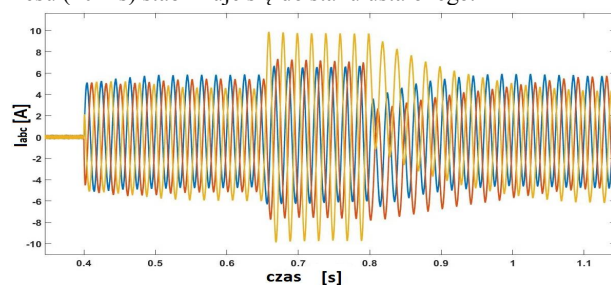
### 2.1. Przerwa w fazie L1 jednego przekształtnika

Rysunek 5 przedstawia schemat układu przekształtnikowego z zaznaczonym miejscem przerwy w obwodzie. Dokonano pomiarów prądu i napięcia bezpośrednio za każdym przekształtnikiem oraz na wyjściu obu układów.

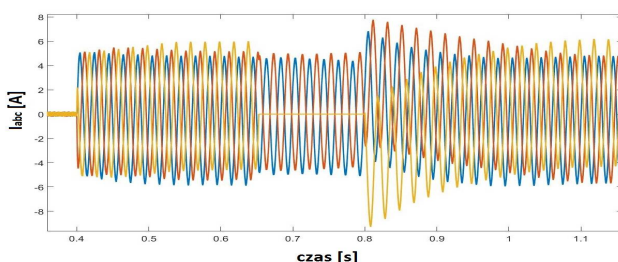


Rys. 5. Schemat fragmentu sieci elektroenergetycznej z uwzględnieniem dwóch przekształtników połączonych równolegle, z trybem pracy wielokanałowej przy przerwie w fazie L1 przekształtnika nr 2

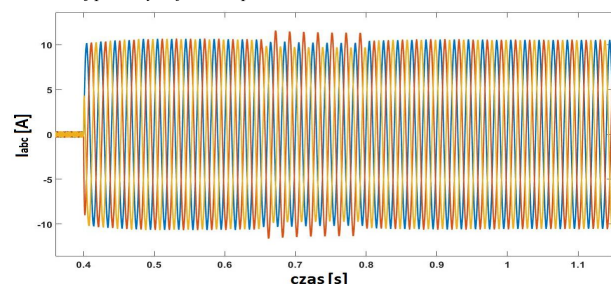
Wyniki symulacji ilustrują rys. 6, 7 i 8, na których przedstawiono kolejno przebiegi prądów: na wyjściu pierwszego przekształtnika, na wyjściu drugiego oraz sumaryczny prąd na wyjściu obu urządzeń. W chwili czasowej  $t = 0,4$  s układ synchronizuje się z siecią elektroenergetyczną i w przeciągu pół okresu (10 ms) stabilizuje się do stanu ustalonego.



Rys. 6. Przebieg prądu na wyjściu pierwszego przekształtnika podczas powstania krótkotrwałej przerwy w fazie L1 przekształtnika 2



Rys. 7. Przebieg prądu na wyjściu drugiego przekształtnika podczas powstania krótkotrwałej przerwy w fazie L1 przekształtnika 2



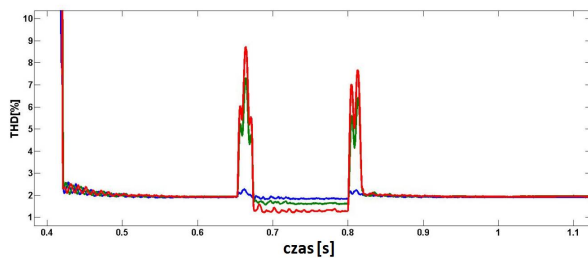
Rys. 8. Przebieg sumarycznego prądu na wyjściu przekształtników podczas powstania krótkotrwałej przerwy w fazie L1 przekształtnika nr 2

Następnie w wyniku pojawienia się przerwy w chwili  $t = 0,65$  s w jednej z faz drugiego przekształtnika, powstaje wyraźna dysproporcja pomiędzy prądami poszczególnych faz. Prąd pierwszej fazy zanika, ale w tym czasie pierwszy przekształtnik przejmuje dodatkowe obciążenie i uzupełnienia niedoboru mocy. Tym samym ciągłość zasilania zostaje zachowana, a zakłócenie nie wpływa znacząco na sieć (rys. 8).

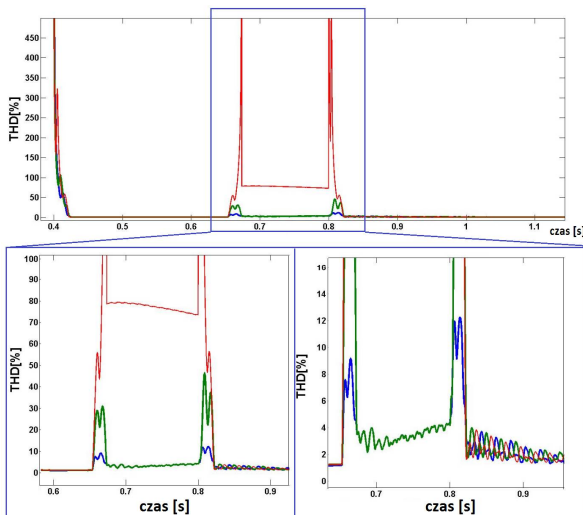
Po ustąpieniu awarii w chwili  $t = 0,8$  s i powrocie do pracy trójfazowej drugiego przekształtnika, układ powraca do stanu ustalonego w czasie 0,2 s synchronizując się z siecią elektroenergetyczną.

Dokonano analizy porównawczej współczynnika THD prądu wyjściowego dla omawianej przerwy w fazie, aby udowodnić zasadność stosowania przekształtników wielokanałowych. Rozpatrzono dwa przypadki:

- pojedynczy przekształtnik,
- przekształtnik wielokanałowy.



Rys. 9. THD prądu na trzech fazach, na wyjściu dwóch przekształtników pracujących układzie wielokanałowym. Zakłócenie typu przerwa w fazie. W czasie do 0,4 s przekształtnik nie oddaje energii do sieci



Rys. 10. THD prądu na trzech fazach, na wyjściu jednokanałowego przekształtnika w trakcie trwania zakłócenia typu przerwa w fazie. W czasie 0,1–0,4 s przekształtnik nie oddaje energii do sieci

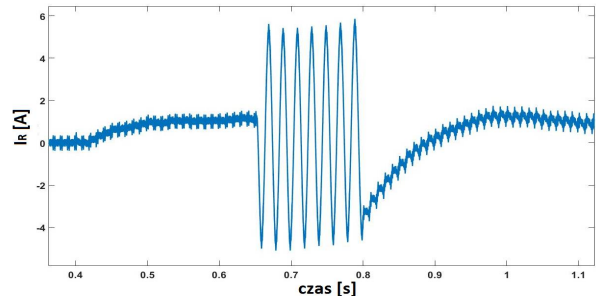
Interpretując wyniki z rys. 9 i rys. 10 można stwierdzić, że przekształtnik wielokanałowy w trakcie pracy ustalonej czas 0,5–0,6 s  $THD_1$  prądu wyniosło poniżej 1,9% natomiast w trakcie trwania zakłócenia zarejestrowano  $THD_1$  na poziomie 2%.

Porównując te wyniki z przekształtnikiem jednokanałowym uzyskano  $THD_1$  dla pracy ustalonej 1,9% oraz przy zakłóceniu 3,8% dla dwóch faz oraz powyżej 70% dla fazy zwartej. Wyniki przedstawia tabela 1.

Tabela 1. Wyniki  $THD_1$

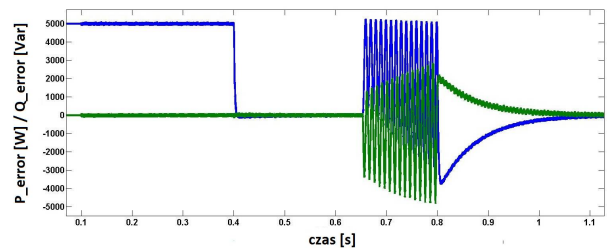
Rodzaj pracy		$THD_1$ - (0,5–0,6 s)	$THD_1$ - (0,65–0,68 s)	$THD_1$ - (0,68–0,8 s)	$THD_1$ - (0,8–0,82 s)
wielokanałowa	L1	~ 1,9 %	< 9,0%	2,0%	< 7%
	L2		< 7,0%	2,0%	< 6%
	L3		< 2,3%	1,9%	~ 2%
jednokanałowa	L1	~ 2%	-	< 150%	-
	L2		< 10%	< 4%	< 12%
	L3		< 30%	< 4%	< 45%

Problem, który pojawia się podczas przerwy w jednej z faz, może doprowadzić do płynięcia dużych prądów wyrównawczych pomiędzy przekształtnikami. Rys. 11 przedstawia różnicę prądów między przekształtnikami. Prądy wyrównawcze w stanie normalnej pracy, w badanym przypadku, nie osiągają znaczących wartości. W celu zminimalizowania ryzyka wystąpienia dużych prądów między przekształtnikami stosuje się dławiki kompensujące w obwodach wyjściowych przekształtnika (rys. 5) [4].

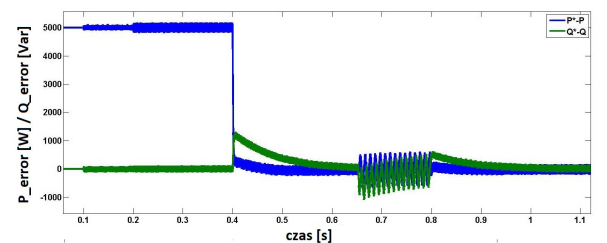


Rys. 11. Różnica prądów między przekształtnikami w stanie ustalonym (0,4–0,65 s), podczas przerwy w fazie (0,65–0,8 s), a następnie od 0,8 s podczas płynnego powrotu do stanu ustalonego

W celu sprawdzenia, czy przekształtnik wielokanałowy utrzyma moc zadaną na wyjściu dokonano pomiarów błędów wydawanej mocy (różnicy mocy zadanej i zmierzonej na wyjściu przekształtnika). Do celów analizy porównawczej rozpatrzono dwa, omówione wcześniej przypadki awarii.



Rys. 12. Błędy mocy czynnej (niebieski) i biernej (zielony) na wyjściu przekształtnika jednokanałowego ( $P_{ref} = 5$  kW,  $Q_{ref} = 0$  Var)



Rys. 13. Błędy mocy czynnej i biernej na wyjściu przekształtnika wielokanałowego ( $P_{ref} = 5$  kW,  $Q_{ref} = 0$  Var)

Na podstawie analizy porównawczej błędów mocy rys. 12 i rys. 13 można stwierdzić, że w przypadku pojedynczego przekształtnika chwilowy błąd mocy czynnej wynosi aż 5 kW. Natomiast dla przekształtnika wielokanałowego, błąd osiąga wartość zaledwie 212 W. Procentowo daje wynik na poziomie 4,24% mocy zadanej.

## 2.2. Zwarcie międzyfazowe jednego przekształtnika

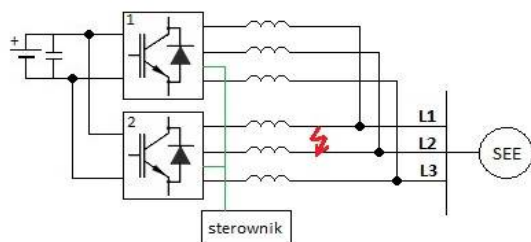
Kolejnym częstym przypadkiem zakłóceń są zwarcia międzyfazowe. Rys. 11 pokazuje schematycznie miejsce zwarcia.

W czasie pracy ustalonej moc przekazywana do sieci jest rozłożona równomiernie na dwa przekształtniki.

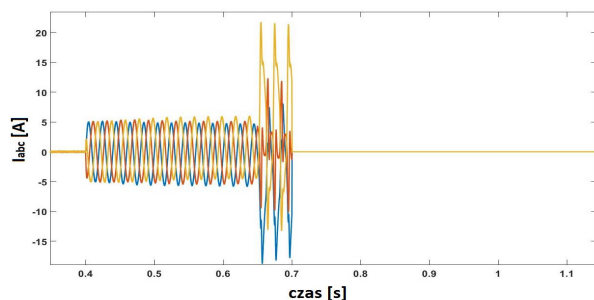
Podczas zwarcia (0,65–0,7 s) następuje silne zniekształcenie prądu zarówno na wyjściu poszczególnych przekształtników jak i sumarycznego prądu wyjściowego. Dla uniknięcia tego negatywnego zjawiska niezbędna jest szybka reakcja układów zabezpieczających, które podają informację do systemu sterowania o zaistniałym zakłóceniu i wyłączają uszkodzony przekształtnik, do momentu jego naprawy. Po wykryciu awarii system sterowania



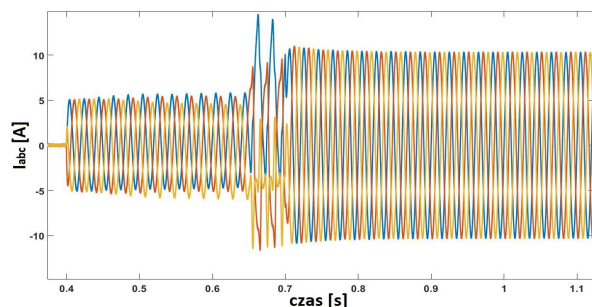
musi dostosować sygnał modulujący w układzie PWM do nowych warunków, w których znalazł się cały układ. Zaczyna wówczas pracować tylko sprawny przekształtnik, co powoduje zwiększenie mocy, w celu skompensowania pracy drugiego uszkodzonego przekształtnika. Ilość energii, którą może przekazać dany przekształtnik zależy od jego parametrów technicznych i zalecanego obciążenia.



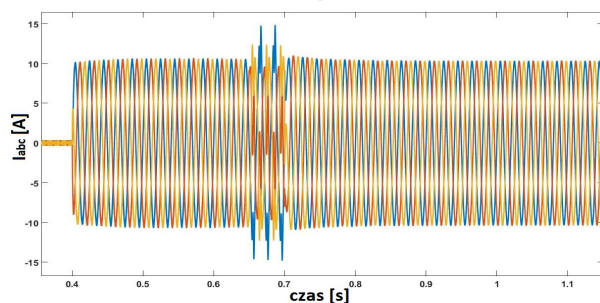
Rys. 14. Schemat fragmentu sieci z widocznym zwarciem międzyfazowym fazy L1 i L2 przekształtnika nr 2



Rys. 15. Przebieg prądu na wyjściu pierwszego przekształtnika podczas powstania krótkotrwałego zwarcia międzyfazowego L1-L2 (0,65–0,7 s) przekształtnika nr 2



Rys. 16. Przebieg prądu na wyjściu drugiego przekształtnika podczas krótkotrwałego zwarcia międzyfazowego L1-L2 (0,65–0,7 s) przekształtnika nr 2



Rys. 17. Przebieg sumarycznego prądu na wyjściu przekształtników podczas krótkotrwałego zwarcia międzyfazowego L1-L2 (0,65–0,7 s) przekształtnika nr 2

Rysunek 17 przedstawia sumaryczny prąd z dwóch przekształtników. Podczas pracy dwóch układów i zastosowania przesunięcia fazowego sygnału pilotowskiego, prąd zawiera mniej harmonicznych, niż prąd po 0,7 s, kiedy pracuje tylko jeden przekształtnik.

W celu poprawienia jakości przebiegu można stosować dodatkowe filtry lub zwiększyć częstotliwość taktowania kluczy. Powoduje to zwiększenie strat w tranzystorach, ale polepsza współczynnik  $THD_1$ , co widać na przebiegach prądu (rys. 17). Badania wykazały, że w omawianym układzie symulacyjnym udało obniżyć się  $THD_1$  prądu przekształtnika z 1,9% dla pracy jednego przekształtnika do 1,15%.

### 3. Wnioski

Z przeprowadzonych badań wynika, że praca równoległa dwóch przekształtników zwiększa niezawodność zasilania systemów przekształtnikowych, a stany przejściowe podczas zwarcia i przerw w fazach nie stwarzają realnego zagrożenia dla systemu elektroenergetycznego w przypadku współpracy z siecią sztywną. Ponadto praca wielokanałowa zmniejsza ilość wprowadzanych do sieci harmonicznych przez układ przekształtnikowy, co przekłada się na obniżenie kosztów związanych z instalowaniem filtrów wyjściowych LCL. W badanym układzie symulacyjnym udało obniżyć się  $THD_1$  prądu przekształtników wielokanałowych w porównaniu do przekształtnika pracującego w trybie jednokanałowym. Badania umieszczone w powyższym artykule wskazują na duże zalety stosowania równoległej pracy przekształtników wielokanałowych również podczas zwarć i przerw w obwodach zasilania jednego z przekształtników.

Różnorodność trybów pracy zapewnia poprawę współczynnika  $THD$  podczas pracy w stanie ustalonym, przejęcie pracy w czasie awarii jednego przekształtnika przez drugi przekształtnik oraz ciągłość zasilania po wyłączeniu jednego uszkodzonego przekształtnika, co widać na przebiegach prądów (rys. 17) po czasie 0,7 s.

Przedstawiony etap badań uzasadnia podjęcie kolejnych prac obejmujących analizę stanów przejściowych i awaryjnych na rzeczywistym układzie przekształtnikowym, pracującym w układzie wielokanałowym uruchamianym z wykorzystaniem platformy dSPACE i oprogramowaniem układu sterowania w programie MATLAB/Simulink oraz C.

### Literatura

- [1] Allagui M., Hasnaoui O., Belhadj J.: A 2MW direct drive wind turbine; vector control and direct torque control techniques comparison. *Journal of Energy in Southern Africa* 25(2), 2014, 117–126.
- [2] Blaabjerg F., Guerrero J. M.: Smart Grid and Renewable Energy Systems. *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2011, 1–10 [DOI: 10.1109/ICEMS.2011.6073290].
- [3] Capella G., Pou J.: Enhanced Phase-Shifted PWM Carrier Disposition for Interleaved Voltage Source Inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, 2014, 1121–1125.
- [4] Laka A., Barrena J. A., Chivite-Zabalza J., Rodriguez-Vidal M.: Parallelization of Two Three-Phase Converters by Using Coupled Inductors Built on a Single Magnetic Core, *Przegląd Elektrotechniczny* 89, 3a/2013, 194–198.
- [5] Milczarek A., Malinowski M.: Proportional Reactive Power Sharing Algorithm in Islanded AC Microgrid. *First Workshop on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE) 2015 Doha*, 1–6 [DOI: 10.1109/SGRE.2015.7208733].
- [6] Rodriguez J., Jih-Sheng Lai, Fang Zheng Peng: Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications, *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, vol. 49, no. 4, 2002, 724–738.
- [7] Zieliński D.: Układ badawczy przeznaczony do analizy synchronizacji przekształtników sieciowych podczas spadków napięcia. *Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska* 2, 2014, 77–80 [DOI: 10.5604/20830157.1109384].
- [8] Zieliński D., Lipnicki P., Jarzyna W.: Synchronization of voltage frequency converters with the grid in the presence of notching. *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 34, Iss: 3, 2015, 657–673.

Mgr inż. Katarzyna Przytuła  
e-mail: poczta.katarzyna@gmail.com

Absolwentka Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej (2014). Obecnie doktorantka na WEIŁ PL. Zainteresowania naukowe obejmują wpływ układów energoelektronicznych na stabilność systemu i całej sieci elektroenergetycznej, przesył energii za pomocą sieci HVDC, dynamiczne układy kompensacji mocy biernej oraz ich analizę z wykorzystaniem środowiska MATLAB/Simulink i innych narzędzi informatycznych.



otrzymano/received: 08.12.2015

przyjęto do druku/accepted: 20.01.2016